
МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.048

М. Г. Киселев, С. Г. Монич, П. С. Богдан, А. С. Ничипорук

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАПЛИВОВ МЕТАЛЛА, ПОЛУЧЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ШТРИПСЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЕЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ, НА ПРОЦЕСС МИКРОРЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

UDC 621.9.048

M. G. Kiselev, S. G. Monich, P. S. Bogdan, A. S. Nichiporuk

INFLUENCE OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF METAL FLOWS ON THE SURFACE OF STRIPS FORMED AS A RESULT OF ITS ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING ON THE PROCESS OF MICRO-CUTTING OF MATERIALS

Аннотация

В статье дана теоретическая и экспериментальная оценка влияния геометрических параметров наплывов металла, полученных на исходной гладкой поверхности стальной штрипсы в результате ее электроэрозионного модифицирования, на процесс микрорезания материалов. Подтверждено, что наплывы металла, образовавшиеся по краю единичной лунки, представляют собой своеобразные мало-размерные режуще-деформирующие элементы, способные осуществлять микроцарапание материалов, уступающих по твердости металлу наплывов.

Ключевые слова:

электроэрозионное модифицирование, штрипса, микроцарапание, микрорезание, единичная лунка, наплывы металла, режуще-деформирующие элементы

Abstract

The article evaluates theoretically and experimentally how geometric parameters of metal flows formed on the initially smooth surface of a steel (У8А) strip as a result of its electrical discharge machining affect the process of micro-cutting of materials. Results of the analysis of the shape and geometric parameters of metal flows are presented, and it is shown that, in the first approximation, they can be represented in the form of an open torus cut along a plane coinciding with the initial surface of the strip. The cutting edge formed by the flows has a closed contour whose shape is close to the circumference and is characterized by a negative front angle.

Keywords:

electrical discharge machining, micro-cutting, strips, metal flows, cutting-deforming elements.

Введение

Предшествующие исследования [1–4] показали, что поверхность после электроэрозионной обработки приобретает режущую способность, которая проявляется в способности снимать стружку с материалов, уступающих

по твердости обработанной металлической поверхности. Эту способность ей придают образовавшиеся по краям перекрывающих друг друга лунок наплывы металла. С целью придания поверхности более высокой режущей способности авторами [5–7] предложено осуществлять ее электроэрозионную об-

работку без перекрытия лунок, т. е. проводить ее электроэрозионное модифицирование. В этом случае по краям единичных лунок образуются наплывы металла значительно большего радиуса и высоты, которые выходят за исходный контур поверхности. Именно эти наплывы металла на модифицированной поверхности представляют собой малоразмерные режуще-деформирующие элементы, способные разрушать материал, уступающий по твердости металлу наплывов.

В [8] представлены и проанализированы результаты исследований влияния энергии электрического разряда и условий его протекания (на воздухе или с применением дистиллированной воды) на геометрические параметры единичной лунки, получаемой на образце из стали У8А, и на микротвердость ее поверхностного слоя. Установлено, что с повышением энергии электрического разряда размеры единичной лунки, включая диаметр наплывов металла по ее краю и их высоту, возрастают, а также увеличивается микротвердость их поверхности. Показано, что при постоянной энергии разряда модифицирование на воздухе обеспечивает по сравнению с применением дистиллированной воды большие значения указанных параметров наплывов металла по краю лунки, выполняющих роль режуще-деформирующих элементов.

Вместе с тем на сегодняшний день почти отсутствуют систематизированные научные данные как теоретического, так и экспериментального характера, отражающие влияние геометрических параметров наплывов металла, полученных на поверхности штрипсы в результате ее электроэрозионного модифицирования, на особенности процесса микрорезания ими материалов, уступающих по твердости металлу наплывов. В связи с этим цель данной работы заключалась в теоретической и экспериментальной оценке влияния геометрических параметров наплывов металла, полученных на исходной гладкой рабочей поверхно-

сти штрипсы в результате ее электроэрозионного модифицирования, на процесс микрорезания материалов.

Анализ геометрических параметров наплывов металла, полученных по краю единичной лунки.

Вначале отметим ряд специфических особенностей, присущих напльвам металла на модифицированной поверхности штрипсы, которые в данном случае рассматриваются как режуще-деформирующие элементы.

На рис. 1 представлена фотография единичной лунки, полученной на рабочей поверхности штрипсы, с указанием ее основных геометрических параметров.

На ней обозначены диаметр наплывов металла d_n , их высота h_n , диаметр лунки относительно исходного положения поверхности d_0 , ширина наплывов металла по краю лунки b_n и ее глубина h_l .

Из рисунка видно, что реальная поверхность наплывов металла имеет развитый микрорельеф, состоящий из большого количества микровыступов и микровпадин. Если их не учитывать, то расположение наплывов металла на поверхности штрипсы схематично можно представить следующим образом (рис. 2).

Из приведенной схемы следует, что наплывы металла по краю лунки имеют в плане замкнутый контур в форме кольца внутренним d_0 и наружным d_n диаметрами и шириной b_n . При этом центр этих окружностей совпадает с центром лунки, т. е. наплывы металла расположены симметрично относительно ее центра (точка O).

В диаметральной сечении лунки ее геометрическими параметрами являются высота наплывов металла h_n , их ширина b_n , глубина лунки h_l и ее радиус R_l . Для более детального анализа геометрических параметров наплывов металла обратимся к схеме, приведенной на рис. 3, где показаны

диаметральный разрез только напы-
вов металла и форма образуемой ими

поверхности по краю лунки.

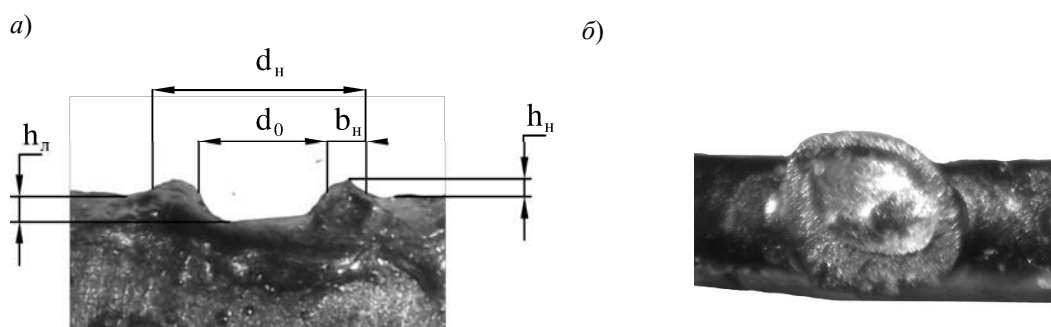


Рис. 1. Единичная лунка, полученная на рабочей поверхности штрипсы (фото): а – вид сбоку; б – вид сверху

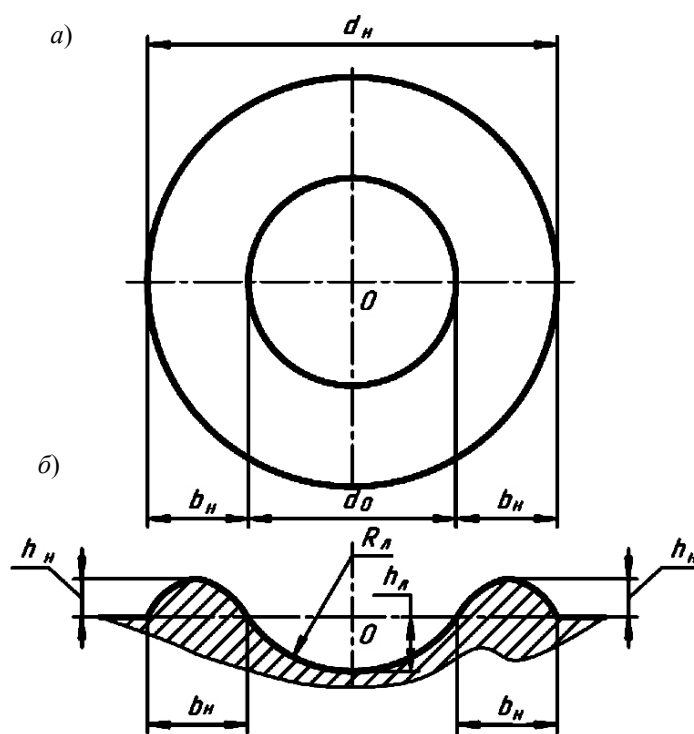


Рис. 2. Схематичное представление единичной лунки в плане (а) и ее диаметрального сечения (б)

Как видно, кривую, описывающую профиль напылов металла в диаметральном сечении, можно представить в виде части (дуги) окружности радиусом r с центром в точке O_1 (воображаемая часть этой окружности показана на рис. 3 пунктирной линией). При этом центр этой окружности (точка O_1) рас-

положен внутри материала штрипсы на расстоянии Δ от положения ее исходной поверхности.

Следовательно, образуемая по краю лунки поверхность представляет собой поверхность вращения, полученную вращением дуги окружности радиусом r вокруг оси OY , лежащей в плос-

кости этой окружности и не пересекающей ее. Такая поверхность [9] представляет собой открытый тор, срезанный по плоскости XOZ , совпадающей с исходной поверхностью штрипсы. С учетом

этого форму диаметрального сечения напылов металла можно представить в виде сегмента круга высотой h_n и хордой (основанием сегмента) b_n .

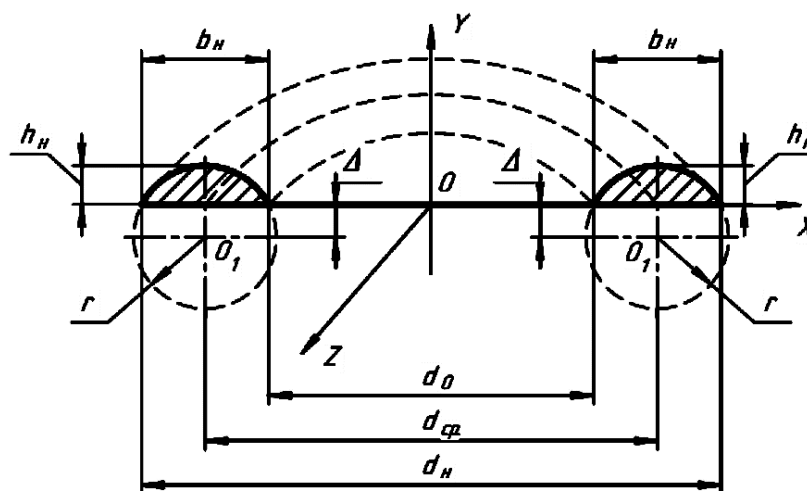


Рис. 3. Схематическое представление диаметрального сечения напылов металла и форма образуемой ими поверхности по краю лунки

С повышением энергии E электрического разряда [8] высота напылов металла h_n по краю лунки и их ширина b_n увеличиваются, но при этом возраста-

ние b_n происходит более интенсивно, чем h_n . Это приводит к изменению формы сегмента, как показано на рис. 4.

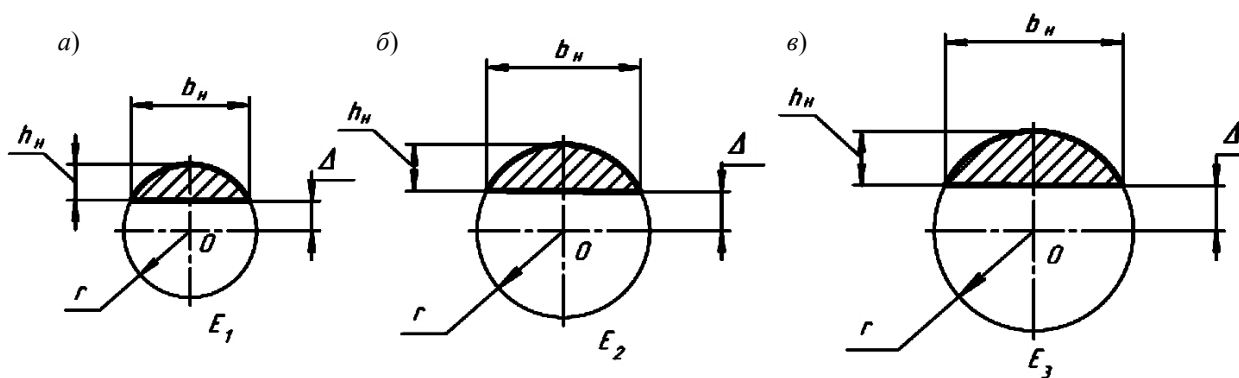


Рис. 4. Схематическое представление изменения формы кругового сегмента в диаметральном сечении напыла металла в зависимости от энергии разряда: а – при E_1 ; б – при E_2 ; в – при E_3 ($E_1 < E_2 < E_3$)

Как видно, с повышением E увеличивается радиус r окружности, а также величина отклонения основания сегмента от центра круга $\Delta = r - h_n$. При этом в силу опережающего возрастания

величины основания сегмента b_n по сравнению с его высотой h_n отношение h_n/b_n с повышением энергии разряда уменьшается, т. е. профиль напыла металла становится более пологим.

На основе отмеченных положений проанализируем геометрические параметры наплывов металла с точки зрения формирования на них режущих элементов (кромки).

В процессе резания инструмент должен занимать определенное положение относительно станка и обрабатываемой заготовки [10]. Непосредственно работу резания выполняет режущая часть под действием усилия, передаваемого от станка через соединительную часть инструмента. Чтобы режущая часть смогла внедриться под отделяемый слой материала, она должна иметь

форму клина. Этот клинообразный элемент режущей части инструмента называют режущим клином. Во всех случаях режущий клин имеет по меньшей мере две рабочие поверхности: переднюю и заднюю. По передней поверхности сходится отделяемая в процессе резания стружка, а задняя поверхность обращена в сторону обработанной поверхности заготовки. Тогда в данном случае (рис. 5) наружная поверхность наплыва металла по краю лунки представляет собой переднюю поверхность режущего клина, а выступающая часть наплыва – его заднюю поверхность.

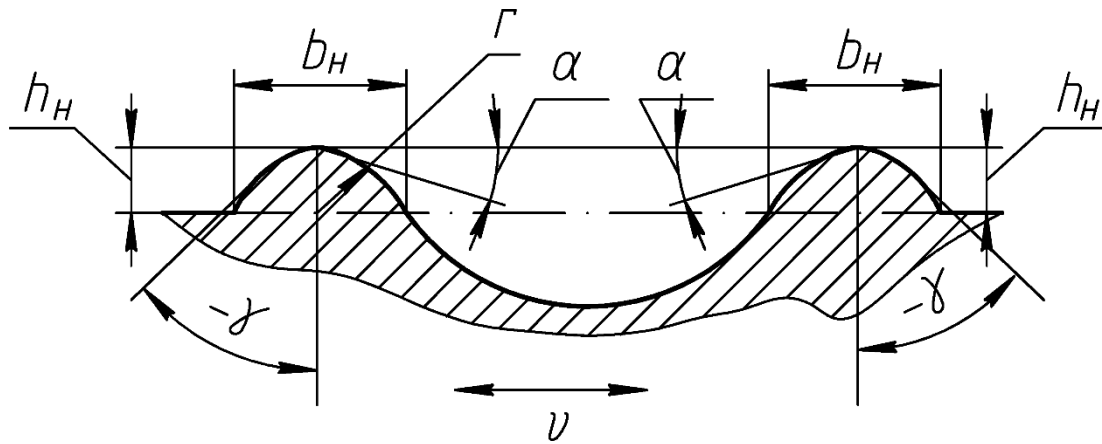


Рис. 5. Схема диаметрального сечения лунки на поверхности штрипсы с указанием геометрических параметров, влияющих на ее режущую способность

Пересечение передней и задней поверхностей образуют край клина, называемый режущей кромкой или режущим лезвием. В данном случае этим лезвием является скругленная по радиусу замкнутая поверхность выступающей части наплыва металла. С учетом этого на схеме (см. рис. 5) обозначены следующие геометрические параметры наплыва металла, влияющие на его режущую способность: γ — передний угол; α — задний угол; r — радиус скругления режущей кромки; h_n — ее высота (высота зуба).

Как и при микрорезании единичным абразивным зерном [11], режущий клин наплывов металла характеризуется отрицательным передним углом γ , зна-

чение которого является одним из определяющих факторов формы срезаемой стружки. Так, при резании с малым передним углом материал заготовки легко удаляется с образованием сливной стружки. С увеличением γ стружка отделяется кусочками, т. е. образуется элементная стружка, а при резании с большим передним углом образуется стружка надлома. В данном случае величины γ и r определяются отношением b_n/h_n , т. е. отношением основания сегмента круга к его высоте, с увеличением которого значения указанных параметров возрастают.

В плане режущая кромка наплывов металла представляет собой дугу окружности радиусом $R = d_{cp}/2$, а глав-

ный угол в плане зависит от глубины резания, с увеличением которой его значение возрастает, что приводит к увеличению ширины срезаемого слоя материала, а также усилению степени его деформирования.

Таким образом, из приведенного анализа следует, что геометрические параметры наплывов металла по краю лунки оправданно оценивать как малоразмерные режущие-деформирующие элементы, способные разрушать материал, уступающий по твердости металлу наплывов.

Приведенный выше анализ выполнен на основе ряда сделанных допущений. В частности, наплывы металла, образовавшиеся по краю лунки, имеют гладкую поверхность, их высота h_n и ширина b_n не изменяются по диаметру наплывов, т. е. они имеют симметричную относительно центра лунки форму и размеры. Очевидно, что

форма и состояние поверхности реальных наплывов металла существенным образом отличаются от их модельного представления. Поэтому для подтверждения положения о том, что наплывы металла по краю лунки представляют собой малоразмерные режущие-деформирующие элементы, была проведена серия специальных экспериментальных исследований.

Методика проведения экспериментальных исследований

В качестве инструмента использовалась стальная (У8А) штрипса длиной 110, шириной 8 и толщиной 0,3 мм. На ее концах выполнены два отверстия диаметром 4 мм, с помощью которых штрипса 1 закреплялась на П-образной рамке 2 и посредством винтового механизма 3 натягивалась на ней (рис. 6).

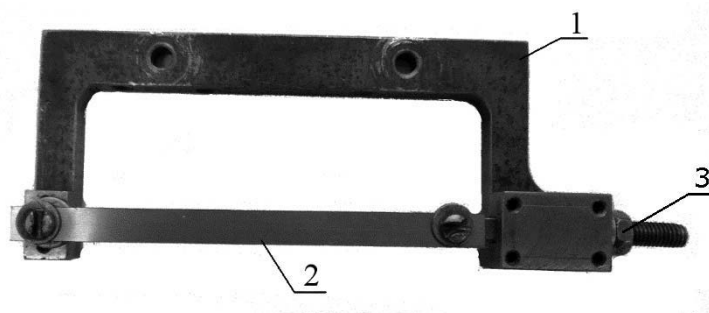


Рис. 6. П-образная рамка с закрепленной на ней штрипсой (фото)

Формирование на рабочей поверхности штрипсы единичной лунки осуществлялось следующим образом (рис. 7).

П-образная рамка 1 устанавливалась вертикально на диэлектрическом (деревянном) основании 4 таким образом, чтобы ее рабочая (обрабатываемая) поверхность располагалась сверху. В качестве электрода-инструмента использовалась стальная пластина 3 толщиной 0,3 мм, которой вручную сообщалось однократное движение сверху вниз, направленное перпендикулярно рабочей поверхности штрипсы 2. Рамка

и электрод-инструмент были включены в электрическую цепь, состоящую из накопительного конденсатора C , токоограничивающего резистора R и источника питания постоянного тока $ИП$. В ходе сближения электрода-инструмента с рабочей поверхностью штрипсы на расстоянии, соответствующем минимальному значению межэлектродного промежутка (МЭП), между ними протекал электрический разряд, вызывающий формирование на поверхности штрипсы единичной лунки, имеющей по краям наплывы металла, выходящие за исход-

ный контур поверхности. Использовалась прямая полярность, т. е. анодом являлась штрипса, диэлектрическая жидкость не применялась. В ходе проведения экспериментов за счет изменения напряжения U накопительного конденсатора от 36 до 75 В при его постоянной емкости 350 мкФ изменялась энергия электрического разряда. С по-

мощью микрометра МК-25 с ценой деления 1 мкм определялась высота напылов металла на поверхности штрипсы путем измерения ее ширины в исходном состоянии и после формирования на ее рабочей поверхности единичной лунки. Диаметр напылов металла измерялся на микроскоме ММИ-2 с точностью ± 5 мкм.

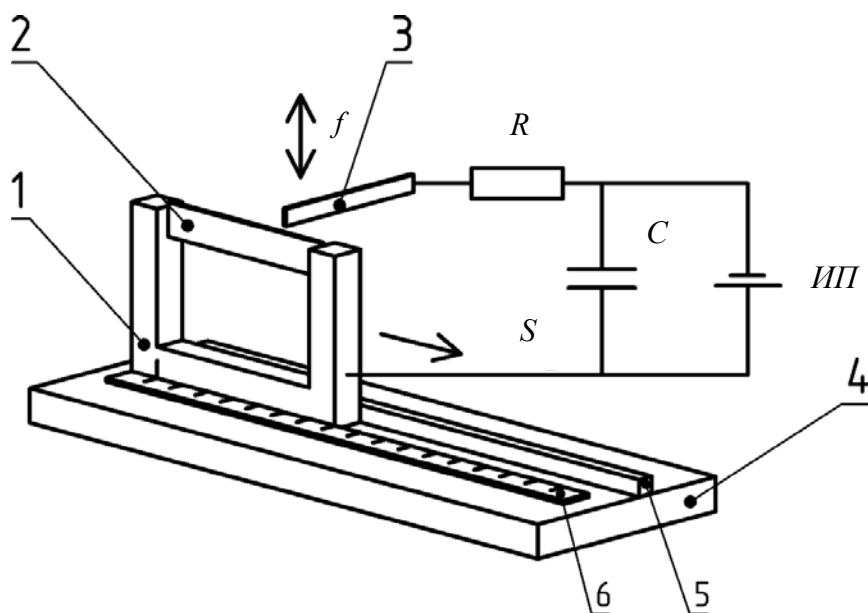


Рис. 7. Схема формирования единичной лунки на рабочей поверхности штрипсы

В качестве обрабатываемых образцов использовались пластины из алюминия, т. е. из материала, уступающего по твердости металлу напылов на штрипсе. Образец своей гладкой поверхностью прижимался к рабочей поверхности штрипсы в ее исходном состоянии и затем однократно плавно перемещался вдоль нее. В процессе этого перемещения происходило взаимодействие напылов металла на штрипсе с поверхностью образца, в результате чего на ней оставалась микроцарапина. С помощью электронного микроскопа изучались форма и состояние поверхности полученных сквозных и тупиковых царапин, а их ширина и глубина определялись по профилограммам, полученным с помощью профилографа-профилометра Taylor Hobson.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

На рис. 8 представлены фотографии сквозных и тупиковых микроцарапин, полученных на поверхности образца в результате взаимодействия с напылами металла на штрипсе.

Согласно рисунку, напылы металла на поверхности штрипсы представляют собой малоразмерные режуще-деформирующие элементы, осуществляющие микроцарапание материала образца. По сравнению с микрорезанием единичным абразивным зерном микроцарапание напылами металла имеет ряд специфических особенностей, обусловленных их формой и размерами. Так, единичное абразивное зерно имеет

одну вершину с отрицательным передним углом, которая, внедряясь в материал, осуществляет его микрорезание. Режущая кромка наплывов металла расположена по краю лунки по замкнутой кривой, близкой по форме к окружности. При этом высота наплывов металла

относительно исходной поверхности штрипсы в пределах этой окружности является переменной, что схематически иллюстрируется разверткой профиля сечения режущей кромки напльва, представленной на рис. 9.

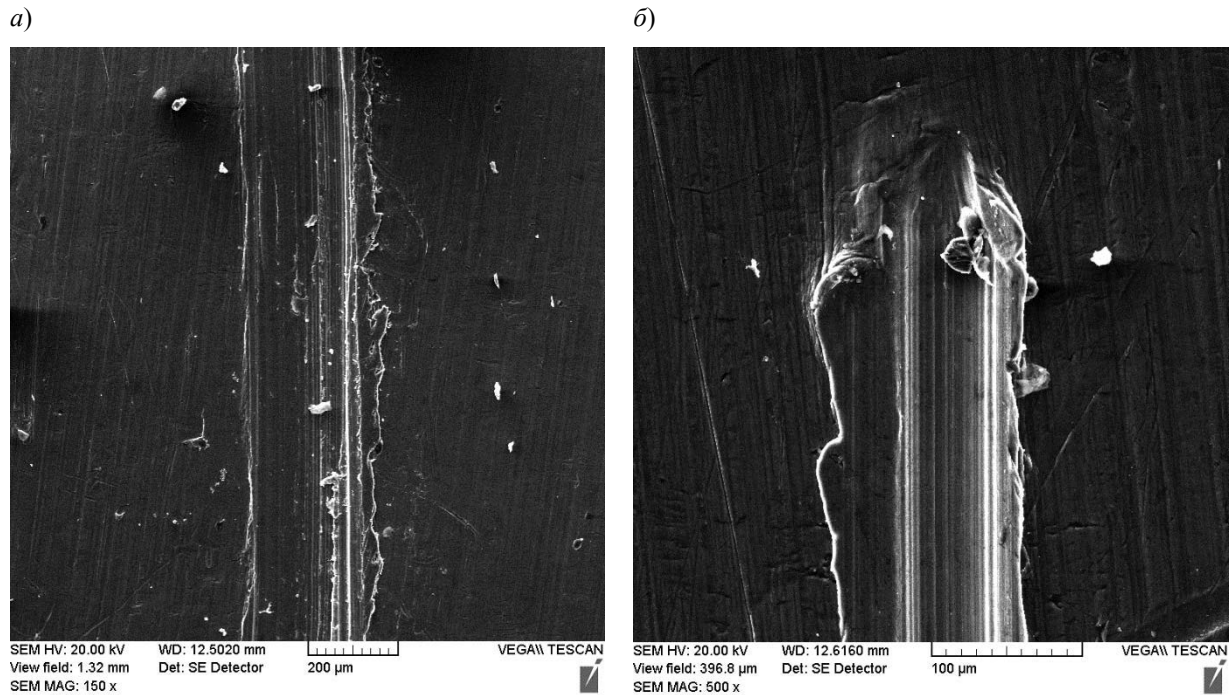


Рис. 8. Сквозная (а) и тупиковая (б) микроцарапины на поверхности алюминиевого образца, полученные в результате ее взаимодействия с напльвами металла на штрипсе (фото)

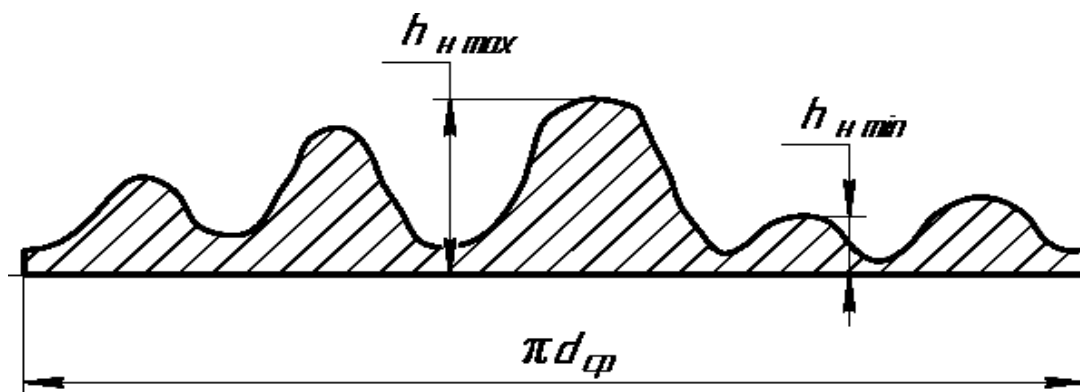


Рис. 9. Схематичное представление развертки профиля сечения режущей кромки напльва металла по краю лунки

Как видно, в пределах окружности диаметра d_{cp} высота наплывов металла изменяется от максимального h_{nmax} до минимального h_{nmin} значения. Таким образом, режущая кромка наплывов металла представляет собой совокупность отдельных режуще-деформирующих микроэлементов, участие которых в процессе микроцарапания зависит от их геометрических параметров и расположения по окружности режущей кромки напыла металла.

В силу указанных обстоятельств в процессе микроцарапания возможны различные условия взаимодействия

наплывов металла с обрабатываемыми материалами, определяющие форму и размеры получаемых на его поверхности микроцарапин. Так, если режущие кромки наплывов металла имеют сравнительно одинаковую высоту, то получаемые как сквозные (см. рис. 8, а), так и тупиковые (см. рис. 8, б) микроцарапины имеют постоянную ширину с образованием по краям заусенцев металла. В этом случае профиль сечения микроцарапины (рис. 10) имеет форму, аналогичную форме при микрорезании единственным абразивным зерном.

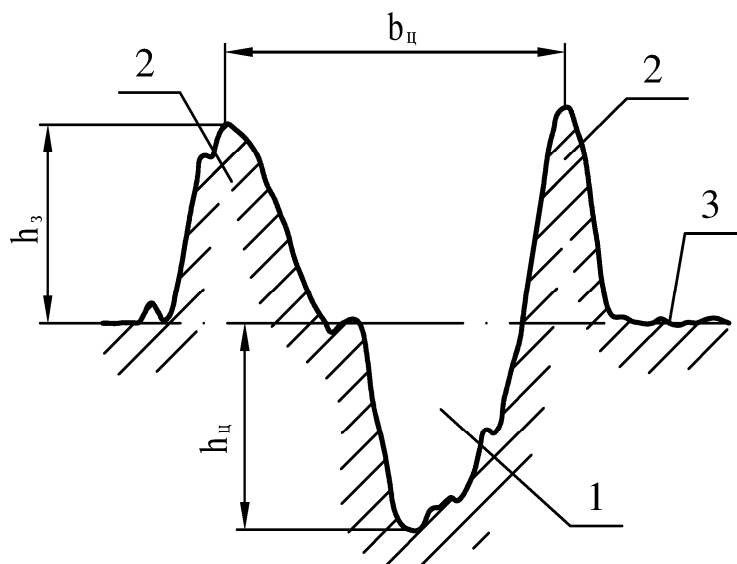


Рис. 10. Форма поперечного сечения микроцарапины, полученной при микроцарапании поверхности образца напылом металла с одинаковой высотой режущих кромок

На рис. 10 обозначены глубина царапины $h_{ц}$, высота заусенцев по ее краю $h_{з}$, ширина этих заусенцев $b_{ц}$.

Если режущие кромки наплывов металла существенно отличаются по высоте, то в формировании микроцарапины участвуют те из них, которые на данный момент имеют наибольшую высоту. Причем эти элементы могут быть расположены как на передней части напыла металла (т. е. по ходу относительно подачи), так и на его противоположной стороне, что наглядно иллю-

стрируется фотографией тупиковой царапины, приведенной на рис. 11.

Как видно, опережающий след царапины формируется за счет микровыступа на передней части этого напыла, а отстающий – за счет микровыступа, расположенного на его противоположной стороне. Поэтому получаемый профиль сечения следа состоит из двух микроцарапин (рис. 12), формируемых соответствующими микровыступами на поверхности наплывов металла.

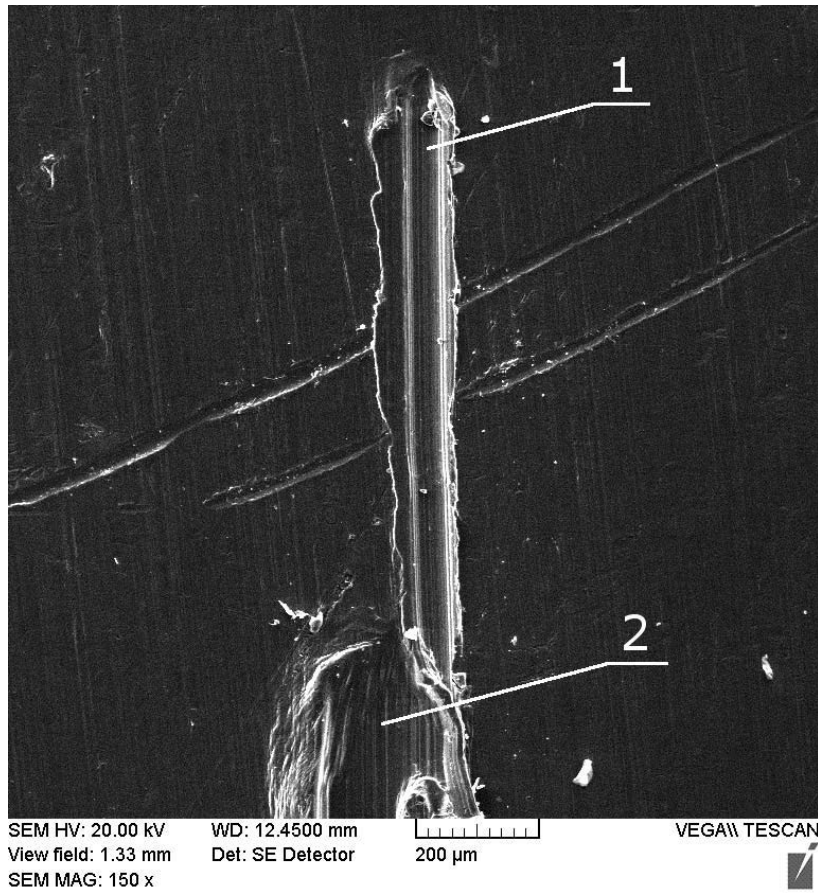


Рис. 11. Тупиковая микроцарапина на поверхности образца, состоящая из опережающей 1 и отстающей 2 частей (фото)

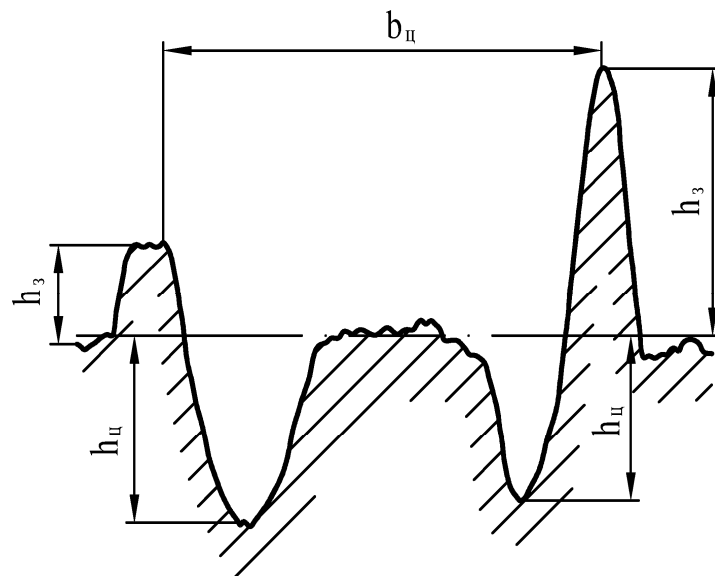


Рис. 12. Формы поперечного сечения микроцарапины, полученной при микроцарапании поверхности образца напльваами металла с различной высотой режущих кромок

Экспериментальные данные, отражающие влияние напряжения накопительного конденсатора (энергии электрического разряда) на диаметр наплывов металла d_n на поверхности

штрипсы и их высоту h_n , а также на параметры микроцарапины, полученной на поверхности алюминиевого образца при взаимодействии со штрипсой, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения исследуемых параметров на поверхности штрипсы и параметров микроцарапины на поверхности алюминиевого образца, соответствующие различным напряжениям накопительного конденсатора в процессе модифицирования поверхности штрипсы

Названия исследуемых параметров на поверхности штрипсы и параметров микроцарапины на поверхности алюминиевого образца	Значения исследуемых параметров, мкм, при различном значении напряжения U накопительного конденсатора в процессе модифицирования поверхности штрипсы		
	$U = 36$ В	$U = 42$ В	$U = 75$ В
Диаметр наплывов металла d_n на поверхности штрипсы	105	220	340
Высота наплывов металла h_n на поверхности штрипсы	20	38	44
Глубина микроцарапины на образце h_c	12	17	24
Ширина микроцарапины на образце b_c	85	210	300
Высота заусенцев по краю микроцарапины h_z	10	16	18

Из анализа приведенных данных следует, что с увеличением геометрических параметров единичной лунки на поверхности штрипсы за счет повышения напряжения U накопительного конденсатора (энергии электрического разряда) возрастают параметры получаемой на поверхности образца микроцарапины. Так, с повышением U с 36 до 75 В диаметр наплывов металла по краю лунки увеличился со 105 до 300 мкм, а их высота – с 20 до 44 мкм, при этом глубина микроцарапины на образце возросла с 12 до 24 мкм, ее ширина – со 105 до 300 мкм и высота заусенцев по краю микроцарапины – с 10 до 18 мкм.

Таким образом, теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что образовавшиеся в результате электрической эрозии наплывы металла по краю единичной лунки представляют собой своеобразные малоразмерные режуще-деформирующие элементы, способные осуществлять

разрушение материала, уступающего по твердости металлу наплывов, путем его микрорезания.

Выводы

1. Результаты анализа формы и геометрических параметров наплывов металла, образовавшихся по краю лунки при воздействии электрического разряда, показали, что в первом приближении их можно представить в форме открытого тора, срезанного по плоскости, совпадающей с исходной поверхностью штрипсы, имеющей в диаметральном сечении форму сегмента круга радиусом r , высотой h_n и основанием сегмента b_n . Показано, что с повышением энергии единичного электрического разряда увеличивается радиус r окружности, а также величина отклонения основания сегмента от центра круга $\Delta = r \dots h_n$. При этом в силу опережающего возрастания величины основания

сегмента b_n по сравнению с его высотой h_n отношение h_n/b_n с повышением энергии разряда уменьшается, т. е. профиль напылов металла становится более пологим.

2. Показано, что наружная поверхность напыла металла по краю лунки представляет собой переднюю поверхность режущего клина, а выступающая часть напыла – его заднюю поверхность. Пересечение этих поверхностей образует режущую кромку, которая в плане имеет замкнутый контур, по форме близкий к окружности, и скругленную в поперечном сечении по радиусу r выступающую часть напыла металла. Режущая кромка напылов металла характеризуется отрицательным передним углом γ , значение которого, как и величины r , определяется отношением b_n/h_n , с увеличением этого отношения значения указанных параметров возрастают.

3. Разработана методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая оценить влияние геометрических параметров напылов металла на модифицированной поверхности штрипсы на процесс микроцарапания ими поверхности алюминиевого образца.

4. На основе анализа формы и размеров сквозных и тупиковых царапин, полученных на поверхности алюминиевого образца при взаимодействии с напылами металла на штрипсе, установлено следующее.

4.1. Получаемые на поверхности

образца следы являются результатом процесса ее микроцарапания напылами металла на штрипсе, протекающего с формированием стружки и заусенцев по краям микроцарапины.

4.2. Форма получаемой микроцарапины в поперечном сечении определяется количеством и расположением в пределах замкнутого контура режущей кромки элементов напылов металла, имеющих на данный момент наибольшую высоту.

4.3. С увеличением геометрических параметров единичной лунки на поверхности штрипсы за счет повышения напряжения U накопительного конденсатора (энергии электрического разряда) возрастают параметры полученной на поверхности микроцарапины. Так, с повышением U с 36 до 75 В диаметр напылов металла по краю лунки увеличился со 105 до 300 мкм, а их высота – с 20 до 44 мкм, глубина микроцарапины на образце возросла с 12 до 24 мкм, ее ширина – со 105 до 300 мкм и высота заусенцев по краю микроцарапины – с 10 до 18 мкм.

4.4. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что напылы металла, образовавшиеся по краю единичной лунки, представляют собой своеобразные малоразмерные режуще-деформирующие элементы, способные осуществлять микроцарапание материалов, уступающих по твердости металлу напылов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валиков, Е. Н.** Обкатник для обработки кромок зубьев крупногабаритных зубчатых колес / Е. Н. Валиков, Ю. С. Тимофеев, А. С. Журина // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2013. – № 8. – С. 260–263.
2. **Валиков, Е. Н.** Финишная отделка зубчатых колес с использованием режущих свойств поверхностей после электроэрозионной обработки / Е. Н. Валиков, Ю. С. Тимофеева, А. С. Журина // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Ч. 1, № 12. – С. 17–20.
3. Эффективность применения электроконтактной обработки поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2013. – № 11. – С. 73–77.
4. Экспериментальная оценка режущей способности штрипс с модифицированной путем электроконтактной обработки рабочей поверхностью / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – Т. 28, № 3. – С. 64–68.

5. Влияние скорости вращения рабочей поверхности отрезного диска в процессе ее электроэрозионной обработки на режущую способность инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – Т. 35, № 2. – С. 58–62.

6. Влияние энергии и условий воздействия электрических разрядов в процессе модификации рабочей поверхности стального отрезного диска на его режущую способность / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2015. – Т. 31, № 2. – С. 53–58.

7. Влияние электроконтактной обработки поверхности самореза на условия его вкручивания в образцы из различных материалов и выкручивания из них / М. Г. Киселев [и др.] // Наука и техника. – 2015. – № 5. – С. 3–9.

8. Влияние энергии электрического разряда и условий его протекания на геометрические параметры единичной лунки и микротвердость ее поверхностного слоя / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 2. – С. 53–58.

9. **Бронштейн, И. Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – 13-е изд., исправ. – Москва : Наука, 1986. – 544 с.

10. **Грановский, Г. И.** Резание металлов : учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва : Высшая школа, 1985. – 304 с.

11. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент / С. А. Рубинштейн [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1968. – 392 с.

Статья сдана в редакцию 28 июня 2018 года

Михаил Григорьевич Киселев, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: kiselev.maikl@gmail.com.

Сергей Геннадьевич Монич, ст. преподаватель, канд. техн. наук, Белорусский национальный технический университет. E-mail: kayak88@yandex.by.

Павел Сергеевич Богдан, ассистент, Белорусский национальный технический университет. E-mail: bpc@mail.ru.

Андрей Степанович Ничипорук, студент, Белорусский национальный технический университет.

Mikhail Grigoryevich Kiselev, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: kiselev.maikl@gmail.com.

Sergey Gennadyevich Monich, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian National Technical University. E-mail: kayak88@yandex.by.

Pavel Sergeevich Bogdan, assistant lecturer, Belarusian National Technical University. E-mail: bpc@mail.ru.

Andrey Stepanovich Nichiporuk, student, Belarusian National Technical University.